

## Gasgefüllte Detektoren (Zählrohre, Driftkammern)

Zählrohre sind gasgefüllte Kammer, in denen geladene Teilchen entlang ihrer Bahn Gasatome ionisieren. Zwischen der Wand des Zählrohrs und einem entlang seiner Achse gespannten Draht besteht eine Spannung und damit ein elektrisches Feld, in dem Ionen und Elektronen in entgegengesetzte Richtungen driften. Je nach Spannung werden verschiedene Signale erzeugt:

- geringe Hochspannung zwischen den Elektroden, kleines Signal (Ionisationskammer)
- mittlere Spannung (Proportionalzähler) mit Sekundärionisation, Signal höher, aber noch proportional zum Energieverlust
- hohe Spannung (Geiger-Müller-Zählrohr): lawinenartige Sekundärionisation, keine Korrelation zwischen Energieverlust und Signalthöhe.

In Driftkammern sind viele Drähte gespannt, deren Signal Auskunft über den Ort des Energieverlust gibt. Neben der Signalthöhe wird die Driftzeit gemessen, die vom Abstand der Teilchenspur zum Draht abhängt, sowie die Zeitdifferenz der Signale an beiden Enden des Drahts, die vom Ort entlang des Drahts abhängt. Meist befindet sich eine Driftkammer in einem (möglichst homogenen) Magnetfeld, so dass aus der Spurkrümmung auf den Teilchenimpuls geschlossen werden kann: Zentripetalkraft = Lorentzkraft

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = q \cdot v \cdot B \quad \text{praktische Faustregel}$$

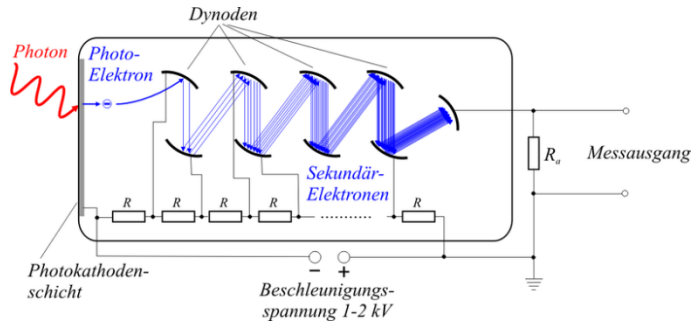
$$m_0 \gamma \cdot v = p = q \cdot B \cdot R \quad \rightarrow \quad p[\text{GeV}/c] = 0,3 \cdot B[\text{T}] \cdot R[\text{m}]$$

## Halbleiterdetektoren (einzelne Zähler, Fotodioden, Streifen- und Pixeldetektoren)

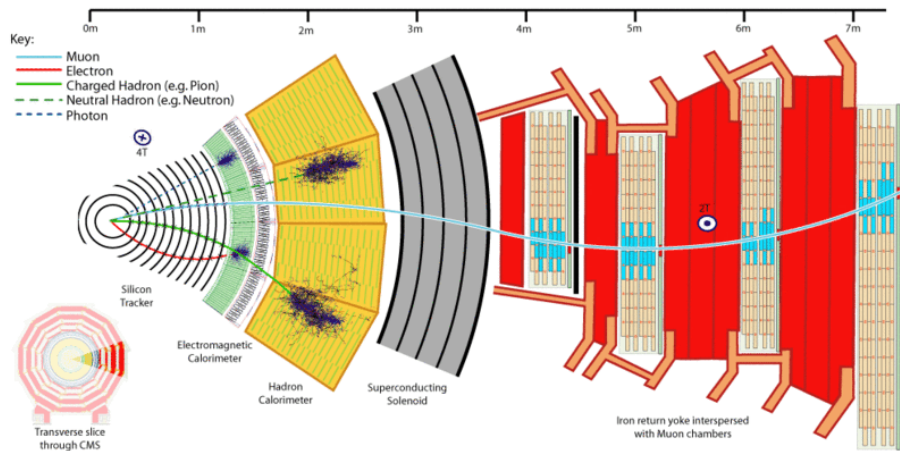
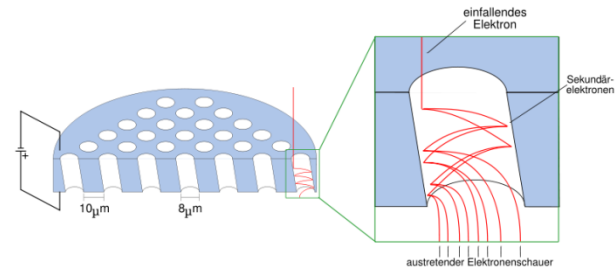
Halbleiterdetektoren sind in Sperr-Richtung betriebene Dioden, bei denen zunächst praktisch kein Strom fließt. Geladene Teilchen erzeugen Elektron-Loch-Paare, die als Strom registriert werden. Photonen erzeugen durch Photoeffekt freie Elektronen, deren kinetische Energie ebenfalls Elektron-Loch-Paare erzeugen. Vorteilhaft ist bei Halbleiterdetektoren die Bandlücke um 1 eV, die kleiner ist als die Ionisationsenergie in Zählrohren: je mehr Ladungsträger das Signal erzeugen, desto kleiner ist der statistische Fehler. Die kompakte Bauform ermöglicht segmentierte Detektoren mit hoher Ortsauflösung: CCDs, Streifen- oder Pixeldetektoren mit Strukturgrößen im  $\mu\text{m}$ -Bereich, wobei der Ladungsschwerpunkt benachbarter Streifen oder Pixel den Ort einer Teilchenspur im sub- $\mu\text{m}$ -Bereich festlegt. Bei CCDs wird die lokal entstehende Ladung zeilenweise von Pixel zu Pixel bis zum Rand verschoben und dort verstärkt. Das ist relativ langsam (Auslesezeit um 1 ms). Streifendetektoren haben einen Verstärker pro Streifen auf einem benachbarten Mikrochip, manche Pixeldetektoren verstärken die Ladung direkt auf dem Pixel (Auslesezeit im ns-Bereich). Ein wichtiger Punkt für Anwendungen in der Teilchenphysik ist die Strahlungshärte von Detektor und Ausleseelektronik.

## Szintillatorzähler und szintillierende Fasern

Teilchen oder Photonen erzeugen durch Anregung von Atomen in einem Szintillator Lichtblitze, die detektiert werden. Meist wird durch Photoeffekt die Energie des Lichts in kinetische Energie von Elektronen umgesetzt (Photokathode) und die Elektronenzahl in einem Photomultiplier erhöht: die Elektronen werden durch eine Spannung beschleunigt und schlagen lawinenartig weitere Elektronen aus einer Folge von Elektroden, so dass ein gut nachweisbarer Strompuls entsteht. Eine Variante hiervon ist die Mikrokanalplatte (*micro channel plate* MCP), die wie ein Sieb durchlöchert ist, wobei jeder Kanal wie ein Photomultiplier wirkt (Verwendung z.B. in Nachtsichtgeräten). Typische Szintillatoren sind dotierte Kristalle (z.B. NaI, CsI) und manche polymere Festkörper (Plastiksintillatoren). Fasern aus szintillierendem Material können zu einem ortsauflösenden Detektor kombiniert und mit Photomultiplier-Arrays oder Mikrokanalplatten ausgelesen werden.



Fotomultiplier (links) und Mikrokanalplatte (rechts)



Der CMS-Detektor am Large Hadron Collider (CERN) als Beispiel für einen Detektor der Elementarteilchenphysik (Wikipedia, CMS-Kollaboration)

## Detektoren in der Elementarteilchenphysik

### Typischer Aufbau (von innen nach außen)

- **Vertexdetektor (z.B. Siliziumstreifen oder -pixel):** genaue Vermessung von Teilchenspuren (Impuls) und Entstehungsort, Zuordnung mehrerer Spuren zu einem gemeinsamen Ausgangsort
- **Tracker (z.B. Driftkammer oder Zeitprojektionskammer) im Magnetfeld:** Messung des Teilchenimpulses
- **Kalorimeter (z.B. Kombination aus schwerem Material und Szintillator):** Messung der Gesamtenergie, meist getrennt nach elektromagnetischem Kalorimeter (e,  $\gamma$ ) und hadronischem Kalorimeter (p, n,  $\pi$ , K)
- **Myonkammern (z.B. Proportionalzähler):** Nachweis von Teilchen außerhalb der Kalorimeter (i.d.R. Myonen)

# 5 Elementarteilchenphysik

## 5.1 Historie

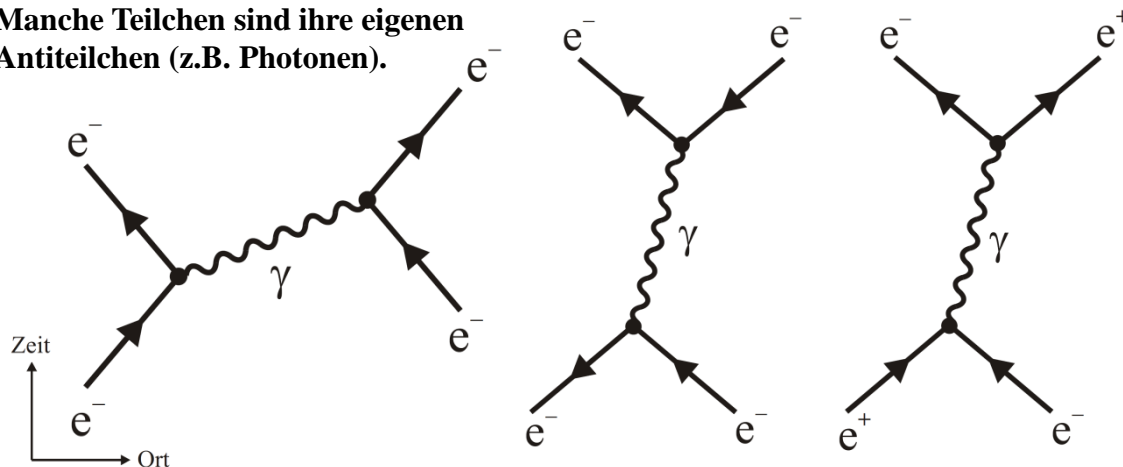
### Antiteilchen

Durch die Entdeckung des Positrons 1932 (gleiche Masse und Wechselwirkung wie das Elektron, aber positiv geladen) wurde die Vorstellung von Antiteilchen etabliert. Sie ergibt sich theoretisch aus der relativistischen Quantenmechanik (Dirac 1927). Gemäß

$$E = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

besteht die Möglichkeit negativer Teilchenenergie. Das Vakuum kann als "Dirac-See" beschrieben werden, der mit Teilchen negativer Energie gefüllt ist. Aufgrund des Pauli-Prinzips können Fermionen nicht in diese bereits besetzten Zustände übergehen, aber durch Aufbringen der zweifachen Ruheenergie können Teilchen von einem negativen in einen positiven Zustand gebracht werden. Das so entstehende "Loch" verhält sich wie ein Teilchen entgegengesetzter Ladung (Antiteilchen). Nach der Feynman-Stückelberg-Interpretation entspricht ein Antiteilchen dagegen einem Teilchen, das sich in der Zeit rückwärts bewegt.

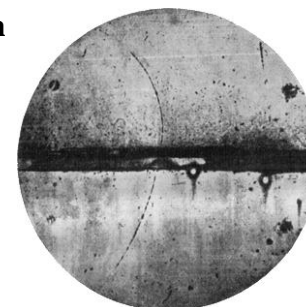
Manche Teilchen sind ihre eigenen Antiteilchen (z.B. Photonen).



**Feynman-Diagramme** veranschaulichen nicht nur Teilchenreaktionen, sondern man kann mit ihnen auch rechnen, z.B. gehört zu jedem Knoten (Vertex) eine Kopplungskonstante  $\alpha^{1/2}$ . Sie ähneln Minkowski-Diagrammen (Auftragung von Ort gegen Zeit), wobei es auf die Steigung der Linien (Geschwindigkeit) nicht so genau ankommt. Wenn man ein Feynman-Diagramm dreht, ergibt sich wieder ein sinnvolles Diagramm z.B. die Wechselwirkung zweier Elektronen durch Austausch eines (virtuellen) Photons (links) entspricht der Elektron-Positron-Annihilation und anschließender Paarbildung (rechts). Hierbei wurden die nach der Drehung in der Zeit rückwärts verlaufenden Elektronen durch vorwärts verlaufende Positronen ersetzt.



Paul A. M. Dirac (1902 - 1984)



Entdeckung des Positrons. Aus der Energieabnahme nach dem Durchgang durch eine Bleiplatte konnte auf die Richtung der Spur festgelegt werden.



Richard Feynman (1918 - 1988)

### Myon und Pion

Die Kraft zwischen zwei geladenen Teilchen wird als Austausch eines Teilchens betrachtet. Im Fall der elektromagnetischen Wechselwirkung ist dies ein Photon. Da es masselos ist, ist die Kraft langreichweitig. Zur Erklärung der kurzreichweitigen starken Wechselwirkung wurde 1935 von Yukawa ein Austauscheteilchen mit Masse > 100 MeV postuliert. Yukawa-Potenzial:

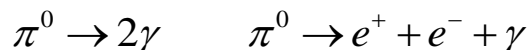
$$V(r) = -g^2 \cdot \exp(-mcr / \hbar) \cdot 1/r$$

Tatsächlich fand C. Anderson 1936 ein 106 MeV\*) schweres Teilchen durch Experimente mit kosmischer Strahlung (er hatte bereits 1932 das Positron entdeckt), das jedoch - wie sich erst 1946 eindeutig zeigte - nicht der starken Wechselwirkung unterlag und nicht das gesuchte Teilchen sein konnte. Es ähnelt eher dem Elektron - wengleich 200x schwerer - und wurde Myon genannt (Isidor Rabi: "Who ordered *that*?")

1947 fand C. Powell ein geladenes Teilchen der Masse 139,6 MeV, das in ein Myon zerfiel



Später wurde auch ein neutrales Teilchen mit Masse 135,0 MeV entdeckt .



Diese "Pionen" unterliegen der starken Wechselwirkung, was z.B. folgende Reaktion mit Kernen zeigt



Damit war das von Yukawa vorhergesagte Teilchen gefunden (die starke Wechselwirkung inzwischen als Austausch von Gluonen geschrienen). Es ist das leichteste "Meson". Der Name rührt daher, dass die Masse des Pions im Bereich zwischen den leichten "Leptonen" (z.B. Elektron) und schweren "Baryonen" (z.B. Proton und Neutron) liegt.

\*) die Werte sind gerundet und der Faktor c<sup>2</sup> (wie oft üblich) weggelassen



Hideki Yukawa  
(1907 - 1981)



Carl Anderson  
(1905 - 1991)



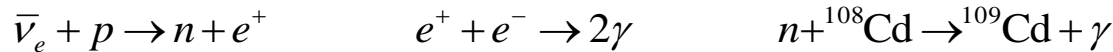
Cecil Powell  
(190e - 1969)

### Leptonen

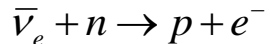
Die Existenz eines (Elektron-)Neutrinos wurde 1930 aufgrund des Elektronenspektrums im  $\beta$ -Zerfall gefordert (W. Pauli). Auch beim Zerfall eines Pions in ein Myon ist ein Neutrino beteiligt. Nach der Entdeckung des Myons wurde aus der Kinematik seines Zerfalls in ein Elektron deutlich, dass zwei Neutrinos entstehen müssen:



Direkt wurden Neutrinos erst 1956 nachgewiesen. Antineutrinos aus einem Reaktor bewirken die Reaktion



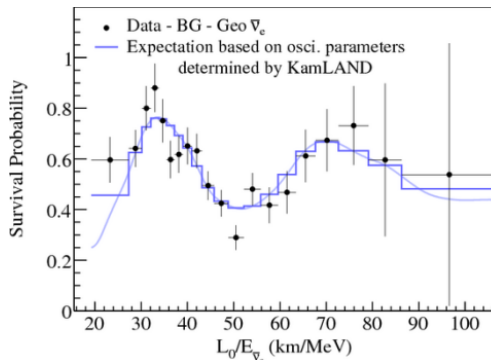
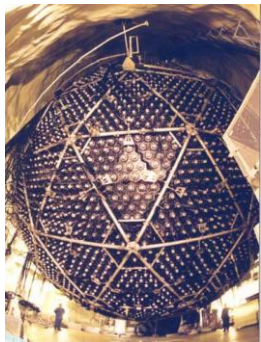
Diese Reaktion ist invers zum  $\beta$ -Zerfall. Neben dem Reaktor wurde ein Tank mit Wasser und darin gelöstem Cadmiumchlorid aufgestellt und die beteiligten Photonen in Koinzidenz nachgewiesen. Die Reaktion



wurde NICHT nachgewiesen. Hieraus und aus anderen Befunden ergab sich:

- jedem geladenen Lepton ist ein Neutrino zugeordnet, es gibt drei Leptonen-Familien.
- die  $e$ -Leptonenzahl,  $\mu$ -Leptonenzahl und  $\tau$ -Leptonenzahl ist jeweils für sich konstant.
- Leptonenzahl  $L = \text{Zahl der negativ geladenen Teilchen plus der Neutrinos minus Zahl der Antiteilchen}$   
(das  $\tau$ -Lepton wurde 1975, das  $\tau$ -Neutrino 2000 nachgewiesen)

Die Neutrinomassen konnten aus den Endpunkten des  $\beta$ -Spektrums noch nicht bestimmt werden, doch zeigt die Beobachtung von Neutrinooszillationen (Umwandlung von einer Familie in eine andere), dass es kleine Massendifferenzen (und damit auch eine endliche) Masse geben muss.



Clyde Cowan  
(1919 - 1974)

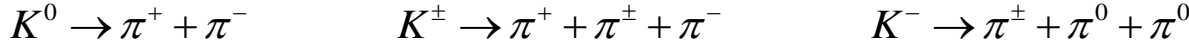


Frederick Reines  
(1918 - 1998)

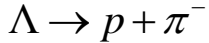
Beispiel für die Beobachtung von Neutrinooszillationen: Als Quellen dienten 55 japanische Kernreaktoren. Das Spektrum der Elektron-Antineutrinos hängt von der Entfernung zum Reaktor ab.

**Quarks (bis 1974)**

Mit dem Aufkommen von Teilchenbeschleunigern in den 1950er Jahren wurden immer mehr Teilchen entdeckt, die durch die Umwandlung von kinetischer Energie in Masse entstanden ("Elementarteilchen-Zoo"). Im Jahr 1949 wurden z.B. Teilchen mit Massen um 500 MeV entdeckt, die paarweise entstanden und in Pionen zerfielen:



Diesen sog. Kaonen wurde eine weitere Quantenzahl, die "Seltsamkeit"  $S$  (*strangeness*) zugeschrieben. Es wurden auch Teilchen entdeckt, die schwerer als das Proton und Neutron sind, z.B. das neutrale Lambda mit 1116 MeV



Aufgrund des Umstands, dass Protonen stabil sind (und nicht z.B. in Positronen zerfallen), wurde als weitere Quantenzahl, für die ein Erhaltungssatz gilt, die "Baryonenzahl"  $B$  postuliert. Offenbar ist das Lambda ein Baryon, während es für Mesonen keine Erhaltungsgröße gibt.

Die Gültigkeit mancher Erhaltungsgrößen hängt von der Wechselwirkung ab, z.B. werden Teilchen mit  $S \neq 0$  durch die starke Wechselwirkung immer paarweise mit  $\Sigma S = 0$  erzeugt, während die  $S$ -Erhaltung bei Zerfällen aufgrund der sog. schwachen Wechselwirkung dieser Teilchen verletzt wird.

1961 wurde begonnen, die Teilchen nach gruppentheoretischen Erwägungen gemäß verschiedenen Quantenzahlen anzuordnen, z.B. das Baryon-Oktett (rechts), vertikal  $S$ , horizontal Isospin  $I_3$ .

Der **Isospin** wurde in die Kernphysik eingeführt, um Proton und Neutron einheitlich zu beschreiben: analog zum Spin haben sie Isospin  $T = 1/2$  und unterscheiden sich in dessen Richtung  $T_3 = \pm 1/2$ . Dieser "eightfold way" (ein Ausdruck aus dem Buddhismus) führte zur Entwicklung des Quark-Modells (M. Gell-Mann, J. Ne'emann, G. Zweig). Der Name "**Quarks**" stammt aus dem Roman "Finnegan's Wake" von James Joyce ("three quarks for Muster Mark") und bezeichnet Spin-1/2-Teilchen mit Ladung  $\pm 1/3e$  oder  $\pm 2/3e$ , die nur in gebundener Form in Baryonen und Mesonen (Hadronen) existieren.

$$Q = \frac{1}{2}(B + S) + T_z = \frac{1}{2}Y + T_z$$

$Q$ : Ladung  
 $B$ : Baryonenzahl  
 $S$ : Strangeness  
 $T_z$ : Isospin  
 $Y = B + S$ : Hyperladung (seltener verwendet)

Das Quark-Modell erklärt die Systematik der Hadronen. Es gewinnt u.a. Realität durch die Beobachtung von "Jets" (Bündel von Teilchen mit ähnlicher Flugrichtung) in Teilchenkollisionen bei hoher Energie sowie durch Streuexperimente mit hoher Energie, die (ähnlich den Rutherford'schen Streuversuchen) Hinweise auf die Bestandteile der Nukleonen geben.

Nach heutigem Verständnis sind Hadronen, d.h. Baryonen und Mesonen zusammengesetzte Teilchen:

- Baryonen bestehen aus 3 Quarks oder 3 Antiquarks**
- Mesonen bestehen aus 1 Quark und 1 Antiquark**
- Leptonen dagegen sind elementare Teilchen.**

Bis 1974 bekannte Quarks:

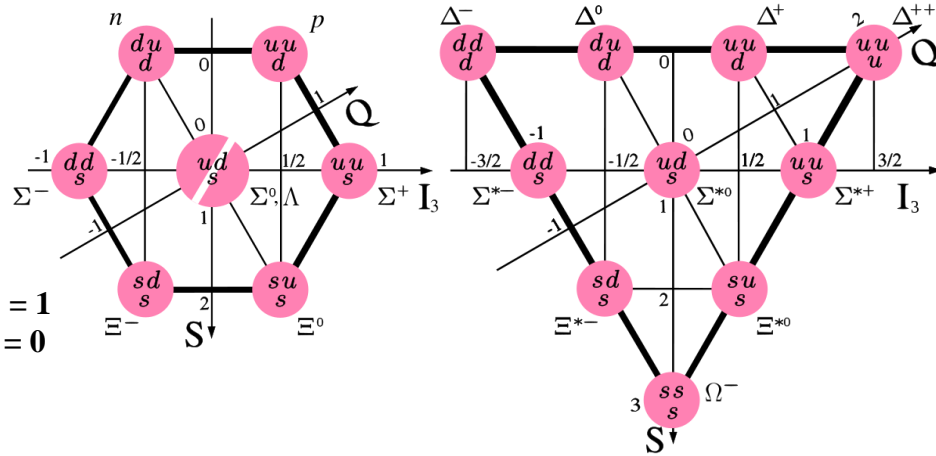
- up (*u*)**  $Q = + 2/3$
- down (*d*)**  $Q = - 1/3$
- strange (*s*)**  $Q = - 1/3$

und die entsprechenden Antiquarks.

Beispiele für Baryonen:

- Proton** = up + up + down  $Q = +2/3+2/3-1/3 = 1$
- Neutron** = up + down + down  $Q = +2/3-1/3-1/3 = 0$

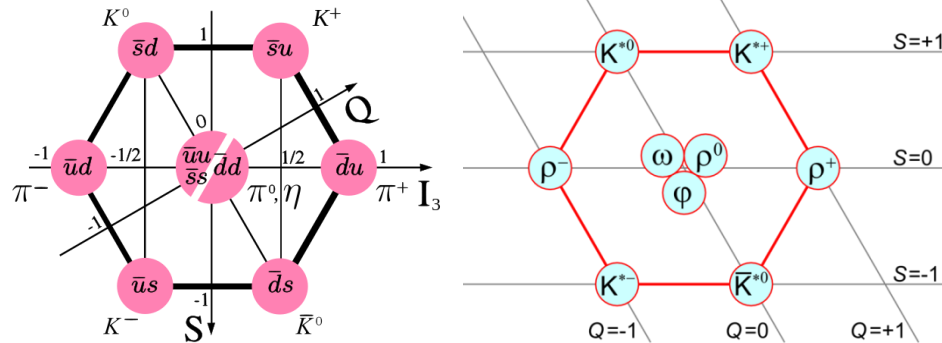
Baryonen-Oktett (Spin 1/2) und Baryonen-Dekuplett (Spin 3/2).  
Hier ist  $I_3$  der Isospin. Manche Autoren verwenden  $T$ , um Verwechslungen mit dem Kernspin  $I$  vorzubeugen.



Ein Erfolg des "eightfold way" war die Vorhersage des  $\Omega$ -Baryons ( $sss$  mit Spin 3/2), das 1964 entdeckt wurde.

Beispiel für Mesonen: Pionen

- $\pi^+$  = up + anti-down  $Q = +2/3+1/3 = 1$
- $\pi^-$  = anti-up + down  $Q = -2/3-1/3 = -1$



(Freie drittelzahlige Ladungen wurden bislang nie beobachtet)

Pseudoskalare Mesonen (Spin 0) und Vektormesonen (Spin 1) - Wikipedia